

# 室內射頻光纖系統

## Indoor Radio over Fiber System

莊明學、李三良

Ming-Hsueh Chuang, San-Liang Lee

由於智慧手持裝置的應用急速成長，具備寬頻傳輸的無線及行動網路佈建變成相當急迫。當用戶的傳輸頻寬需求持續增加時，包括現有的 WiMAX 網路服務以及未來 4G 網路，其無線電訊號在室內容易受到牆壁及室內物品的阻隔，而影響到接收訊號的品質。為有效提高訊號覆蓋率，並提供低成本且彈性的服務，可使用射頻光纖 (radio over fiber, RoF) 技術，克服室內無線訊號穿透性及覆蓋率不足的問題。本文介紹射頻光纖技術及其應用，並以建置於台灣科技大學的系統，說明如何以低成本的模組，佈建大樓的 RoF 系統，並展示佈建前後之傳輸效能差異。

The applications and services of broadband wireless networks, including the existing WiMAX and upcoming LTE systems, has been developed and deployed rapidly owing to the needs of large bandwidth and flexible operation. However, the radio signals subject to the blocking by building envelopes and may have poor indoor signal quality. To improve the coverage of broadband wireless networks inside buildings, the radio-over-fiber (RoF) technology can be used to enhance the indoor radio signal quality. This article introduces the RoF techniques and their applications. We implement an indoor RoF system with low-cost modules and demonstrate the signal quality enhancement by the technology. The goals are to make the RoF modules to be low cost and easy-installation solutions in the building.

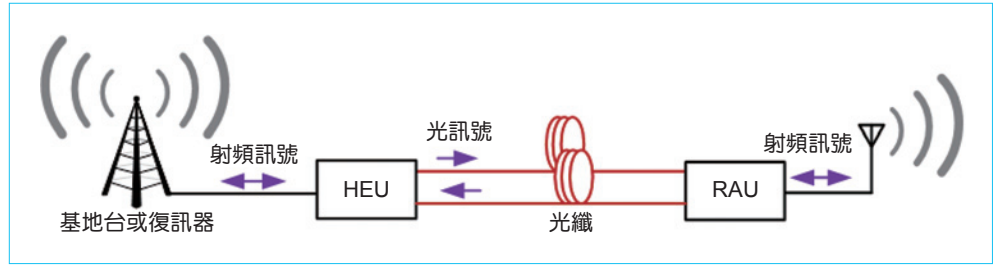
### 一、前言

基於用戶對頻寬的需求遽增，為了滿足未來用戶的高頻寬需求，寬頻光纖網路及無線網路在接入網路的應用日益普遍。更由於技術發展的突飛猛進，傳輸資料速率也有大幅成長。目前使用光纖進行寬頻訊號的傳輸技術上，被動光網路 (passive optical network, PON) 的主流發展趨勢，除了往更高速率 (100 Mbps → 10 Gbps) 及延伸傳輸距離 (> 20 km)，更朝向運用分波多工 (wavelength-division multiplexing, WDM) 技術與改良網路協定以提升服

務效能發展。在下一世代的接入網路中，WDM 技術則是用來增加頻寬和服務的彈性，而無線寬頻服務技術，有 Wi-Fi、WiMAX 及 LTE 等技術相互競爭，其中 WiMAX 與 LTE 由於傳輸距離遠、傳輸速度高，近年來受到業界廣泛關注，也是無線寬頻網路的重點政策，政府未來也將擴大投資無線寬頻，建設成為世界第一的無線寬頻國家。此外偏遠地區也需要架構「無線高速公路」，以縮短數位落差。

光纖有線傳輸與無線傳輸在接入網路的應用上扮演既競爭又合作的角色，未來彼此之間仍是互補

圖 1.  
RoF 基本架構。



有無。無線網路提供彈性且可移動的網路便利性，而光纖可以扮演無線傳輸的骨幹網路，提供基地台的連結以及室內連結，以克服無線訊號穿透性及覆蓋率不足的問題。隨著次世代無線寬頻網路的成熟發展，其應用與服務也急速增加，因為無線電波常受到阻隔，而影響到接收訊號的品質，為有效提高覆蓋率，使用 RoF 技術克服射頻訊號穿透性及覆蓋率不足的問題，成為一種可行且有效的解決方案<sup>(1)</sup>，且具有低損耗、高頻寬和防止電磁干擾的特點<sup>(2)</sup>。

RoF 技術植基於整合有線網路與無線通訊網路優點的通訊架構。圖 1 為 RoF 技術的基本架構，透過 RoF 技術，可將基地台或復訊器所傳輸的射頻電訊號透過頭端單元 (headend unit, HEU) 和調變技術進行光電或電光轉換，並以光纖作為傳輸媒介將光訊號傳遞至分布於他處的遠端天線單元 (remote antenna unit, RAU)。而行動裝置在傳遞上行訊號時，同樣可以透 RoF 系統將訊號穩定地回傳至頭端單元。

在本文中討論 RoF 應用與技術，並評估光源、檢光器和傳輸介質，設計出適用於室內環境的 RoF 架構，研發出低成本的大樓內 RoF 的設備解決方案，並可適用於下個世代寬頻傳輸技術上。

## 二、RoF 技術及其應用

### 1. RoF 技術應用於室內無線通訊傳輸

利用射頻訊號載於光纖上的技術來實現被動式的微微基站 (picocells) 概念首先在 1997 年由英國電信實驗室的 Wake 等人提出<sup>(3)</sup>，使用一個不需外加偏壓的電致吸收調變器 (electro-absorption modulator, EAM) 來同時作為光調變器 (上行用) 與光接收器 (下行用)，連接天線後，EAM 作為連接

至遠端基地台的被動收發機，此系統提供在 2.5 GHz 頻帶半雙工 3 Mbit/s 的網路傳輸速率，架構如圖 2 所示，之後陸續有許多採用 EAM 元件的相關論文發表，除了可以同時做調變器與光接收器功能，最大好處是可以操作在較高頻寬，目前相關研究已可傳送 60 GHz 射頻訊號，傳輸距離約可達 3 公里<sup>(4)</sup>。另外倫敦大學學院 (University College London) 電子工程系光電研究小組設計出一非對稱法布里－派羅德調變器 (asymmetric Fabry-Perot modulator, AFPM)，有 InGaAsP/InGaAsP multi-quantum well (MQW) 電子吸收區結構，最大不同點在於 AFPM 為反射式單端元件，所以只需要一條光纖用來上傳和下傳光訊號，此外有極化不敏感、低穿透損失 (~4 dB) 的優點。

另外 RoF 技術在室內應用上重要的系統架構稱作分布式天線系統 (distribution antennas system, DAS)，應用在室內是為了增強無線網路的覆蓋率，其成本比傳統的同軸電纜低廉，能有較長的傳輸距離，相關研究大都採用 850 nm 或 1310 nm VCSEL 光源，並透過多模或塑膠光纖進行傳輸。所以在許多的研究中均利用分布式天線系統構成室內多功能的 RoF 骨幹，同時進行有線和無線寬頻

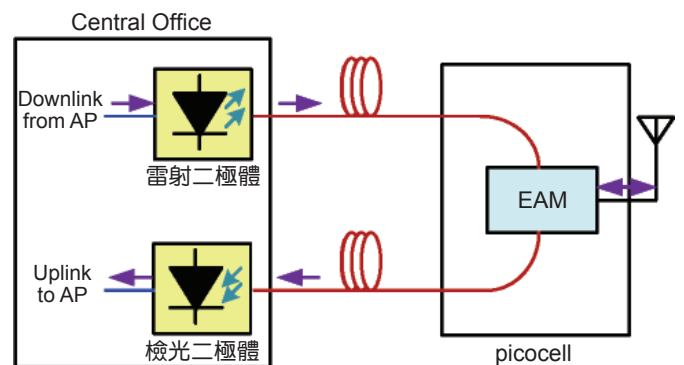


圖 2. RoF 被動式 picocell 架構。

服務。

在 1998 年 Koonen 等人也提出，利用多模或塑膠光纖的 RoF 的雙向連結系統<sup>(5, 6)</sup>，並利用 dispersion-robust 的 RoF 技術來提供分布式天線系統所需的射頻信號，可同時支援多個無線標準與點對多點的服務。通過光交叉連接開關，可配置多個標準室內區域無線網路服務，於同一個 RoF 分布式天線系統中。

## 2. RoF 技術用於長距傳輸

RoF 技術應用在長距離傳輸方面，由於要傳輸較長光纖距離，所以必須使用較複雜的技術，例如 OFDM 訊號與本地震盪頻率混波，目的是先上升為高頻頻段毫米波，之後藉由電光調變器載入光纖，傳送至基地台藉由被動元件交錯器 (interleaver) 將毫米波與載波分開，其中毫米波做為無線傳輸用<sup>(7, 8)</sup>，至接收機必須再作降頻處理，而載波做為上傳光源用，這種方式為載波再利用 (carrier reuse)。另一作法是增加訊號品質，將雙旁波帶 (DSB) 先光訊號處理成單旁波帶 (SSB) 後再經光纖傳輸，目前研究發表證實光纖傳輸距離達 70–80 公里以上<sup>(9, 10)</sup>。

## 3. 有線寬頻接取網路與 RoF 技術整合應用

倫敦大學學院光電研究小組提出一個研究計畫為「Gbit/s Access Network using remote delivery optical feeder for heterogeneous broadband wireless

and wireline nodes (GANDALF)」<sup>(11)</sup>。GANDALF 計畫主要提出可同時提供 Gbit/s 等級的有線與無線網路接取點 (access node, AN)，利用現今環狀光纖網路的架構。在中央控制中心 (control station, CS) 利用雙驅動式電光強度調變器 (DD-MZM)，使得輸出光訊號不但載有基頻訊號、中頻訊號，而且還包括射頻訊號，當光纖連接至遠端接取點 (remote access point, RAP) 時，同時基頻/中頻訊號提供有線通訊使用，射頻訊號則專門提供無線通訊用途。

另一種作法是基於樹狀結構的 EPON 或是 WDM-PON 的光纖網路形式，如圖 3 所示，再整合入無線通訊服務。OLT 端產生之射頻訊號載入光纖並藉由光纖通訊網路傳送到住家或大樓附近的遠端節點 (remote node, RN)，再傳送至住家及大樓內的小型無線基地台，藉由基地台提供微微基地台的無線傳輸功能<sup>(12-14)</sup>。

## 4. RoF 技術應用於高速鐵路系統

為了提供寬頻網路至偏遠地區或是非經常使用網路的區域，而大量興建基地台，這樣會付出較多成本，在較少使用的情形下也造成浪費，若能延伸或分享基地台的訊號來給這些區域使用，則可減少基地台建置數量，以減少建置成本，並提高基地台使用率。高鐵沿線就是一個經典的例子，若為了提供高鐵旅客都能夠有寬頻上網的服務而在鐵路沿線建置基地台，通常只有在列車經過時才會使用到附近的基地台，同時其他基地台並未被使用，使用效

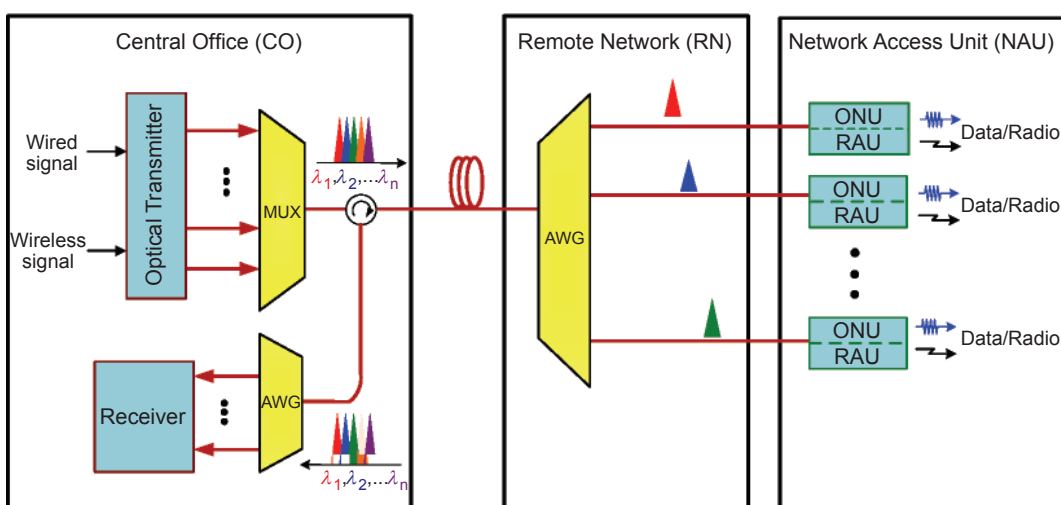


圖 3. 基於 WDM-PON 架構結合有線與無線訊號傳輸示意圖。

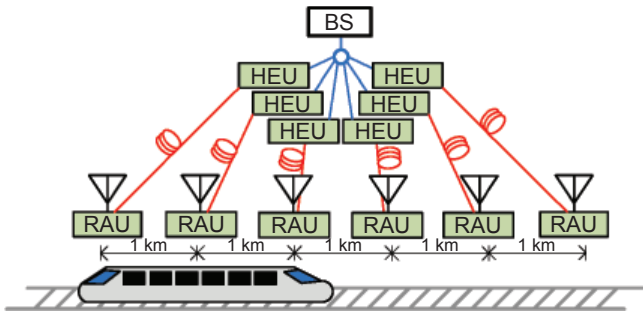


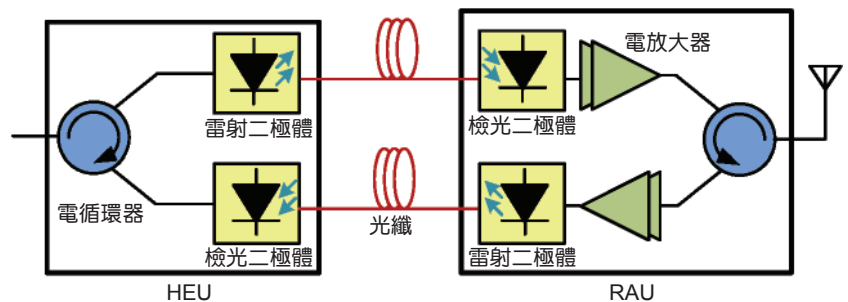
圖 4. RoF 技術應用於高速鐵路系統示意圖。

率不符合建置成本，所以希望透過 RoF 技術將基地台訊號分享並延伸至高鐵沿線。如圖 4 所示，圖中利用 1 台基地台與 6 組的射頻光纖模組來涵蓋 6 km 高鐵沿線的訊號，若以基地台建置至少要多出好幾台基地台建置成本，所以 RoF 網路的技術很適合用於偏遠地區或是非經常使用網路的區域來取代大量基地台的佈建。

### 三、RoF 系統設計與製作

下面的內容中針對射頻光纖技術應用於室內的 RoF 架構進行討論。由於室內無線信號常容易受到阻隔而受到影響，而且是一個較容易測試的場域，所以針對大樓內射頻上載光纖的設備解決方案來進行討論。圖 5 是 RoF 模組的基本架構，利用 HEU 與 RAU 進行光電及電光轉換，在 RAU 端透過電放大器放大訊號功率以及利用天線進行無線訊號的傳輸，使訊號覆蓋範圍內的行動裝置皆可接收到穩定的訊號。接下來會針對 RoF 模組中，電光與電光轉換靜態特性、動態特性以及鏈路預算 (link budget) 進行討論，最後完成模組之製作。

圖 5. RoF 系統之 HEU 與 RAU 的架構圖。



### 1. 電光與電光轉換靜態特性

在 RoF 系統中為了進行射頻調變必須挑選合適的雷射二極體 (laser diode, LD) 來進行電－光的轉換，在室內的應用中可挑選較便宜且動態範圍較小的雷射二極體，在室外可以挑選線性度以及動態範圍較好的雷射二極體，另外規格的挑選包括符合系統需求的 3 dB 頻寬、高的轉換效率 (slope efficiency, SE)、低的相對強度雜訊 (relative intensity noise, RIN) 以及工作溫度範圍等，因為這些參數都會影響到整體 RoF 模組的效能。

在挑選檢光二極體 (photo diode, PD) 時，為了傳送類比訊號時有良好的品質，必須有良好的線性度，所以挑選不含轉組放大器 (transimpedance amplifier, TIA) 的檢光二極體，其他挑選參數包括符合規格的 3 dB 頻寬、高的響應度 (responsivity)、低的失真度 (IMD2 與 IMD3) 以及工作溫度範圍等等，以符合類比應用的需求。

在找出 RoF 系統可輸入的電訊號工作範圍之前，必須先計算出射頻訊號經過 RoF 後所造成的電功率損耗，才可根據不同應用之需求來決定需加入多少電增益於系統中，我們可以根據公式 (1)，計算出光電－電光轉換所造成之功率損失<sup>(15)</sup>。

$$\begin{aligned} & \text{光電－電光轉換之功率損失 (dB)} \\ & = 10 \log \left[ (\eta_{\text{Laser}} \eta_{\text{PD}})^2 \left( \frac{R_{\text{PD}}}{R_o} \right) \right] + 2 f_l f_d \quad (1) \end{aligned}$$

其中， $\eta_{\text{Laser}}$  為使用雷射二極體的轉換效率 (W/A)， $\eta_{\text{PD}}$  為檢光二極體的響應度 (A/W)， $f_l$  為光纖介質中的損耗 (dB/km)， $f_d$  為光纖長度 (km)， $R_{\text{PD}}$

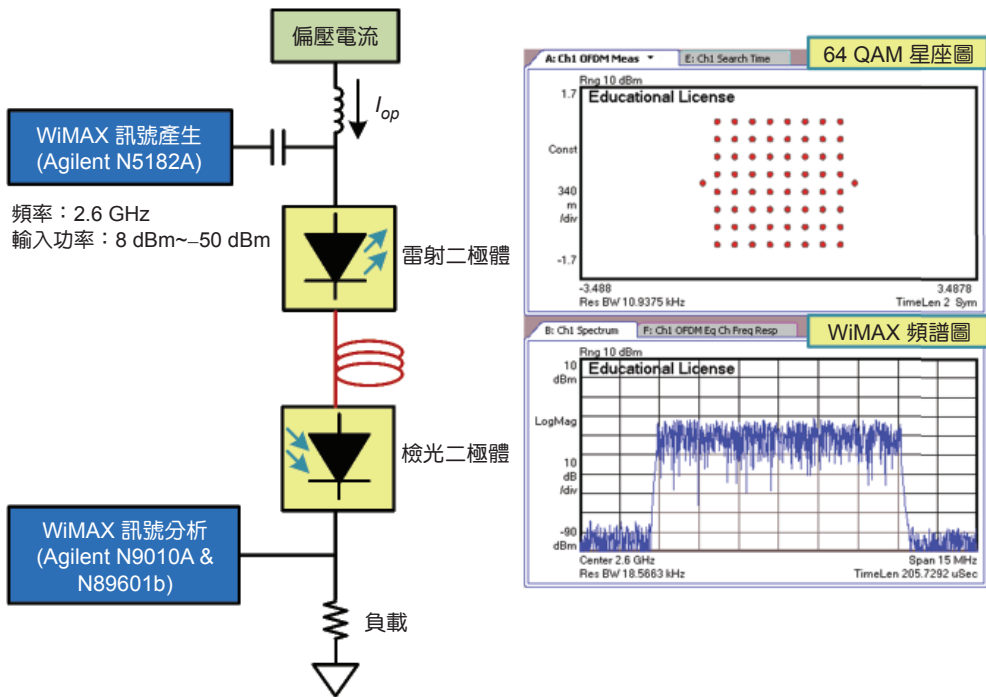


圖 6. 動態輸入範圍量測架構 (右圖為 Agilent 89601b 軟體截圖)。

為檢光二極體的負載電阻 ( $\Omega$ )， $R_o$  為輸出電阻，一般都為  $50 \Omega$ 。

若假設所挑選之元件  $\eta_{\text{Laser}} = 0.11 \text{ W/A}$ 、 $\eta_{\text{PD}} = 0.95 \text{ A/W}$  以及 RPD 為  $50 \Omega$ ，並忽略室內光纖長度所造成之損失，可以求出光電－電光轉換之功率損失為  $19.6 \text{ dB}$ ，當輸入雷射二極體之射頻功率為  $0 \text{ dBm}$  時，檢光二極體之輸出功率約為  $-19.6 \text{ dBm}$ 。這所得到之數值結果僅為初步估計，由於每個元件之參數都會有所變異，實際功率損失還是必須經由實際測量來得到較精確之數值。

## 2. 動態特性量測與分析

在 RoF 中必須找出最佳的動態輸入範圍，來決定模組可輸入之射頻訊號範圍，且必須將雷射二極體與檢光二極體一起考量，針對最佳的輸入工作範圍以及系統的失真度進行量測。圖 6 為動態輸入範圍量測架構，先利用偏壓電流來決定雷射二極體工作點，再用訊號產生器產生射頻訊號並載送於雷射二極體上，在接收端利用負載電阻將檢光二極體的電流轉換成電壓，透過射頻訊號分析儀來分析訊號的優劣。圖 7 為失真度量測架構，利用兩個射頻訊號源來分析失真度，並利用頻譜分析儀來觀察其結果。

圖 8 為動態輸入範圍量測結果。圖中的藍色曲線為輸入射頻功率與輸出射頻功率之間的關係，這代表射頻訊號經過光電與電光轉換後的衰減量。紅色曲線是輸入射頻功率與誤差向量幅度 (error vector magnitude, EVM) 之間的關係<sup>(16, 17)</sup>。當輸入

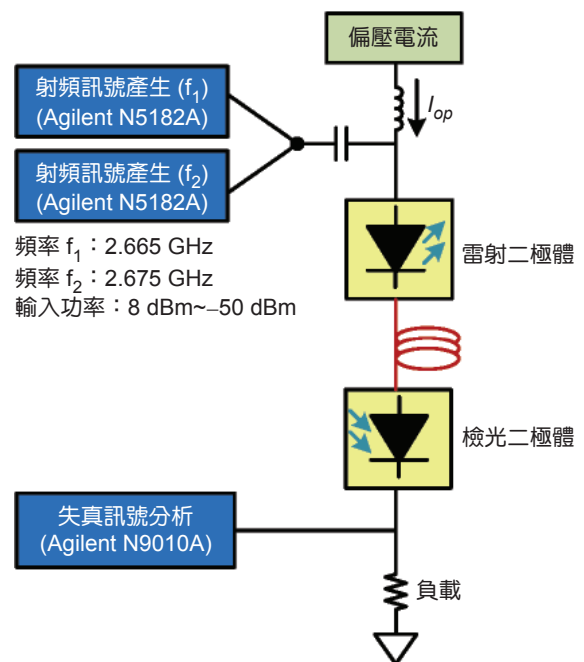


圖 7. 失真度量測架構。

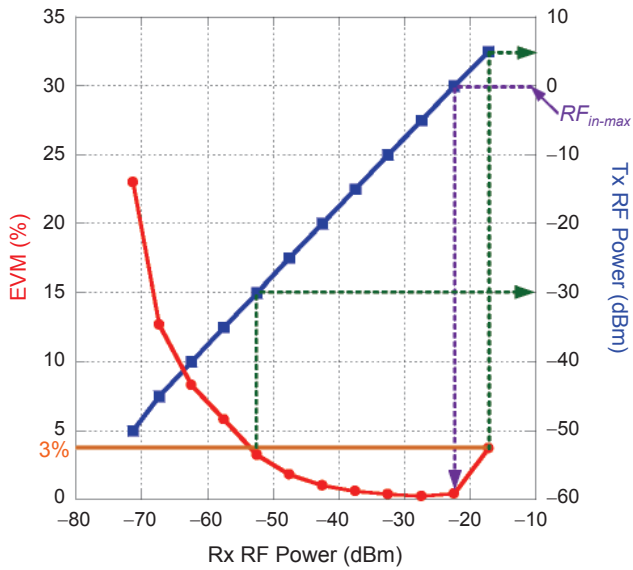


圖 8. 動態輸入範圍量測。

電功率較大時 EVM 會上升，上升的原因是輸入至雷射二極體的射頻功率過大，而超過雷射二極體之線性工作區域，引起輸出波形失真，所以在此圖中，射頻訊號不失真的最大輸入功率為 0 dBm。當輸入功率變小時，EVM 也會因為訊號能量變小而上升，在此區域中 EVM 變差是因為訊號雜訊比 (signal-to-noise ratio, SNR) 變小而造成。若以 WiMAX 為例，當傳送 64 QAM 時 EVM 必須維持在 3% 以下<sup>(18)</sup>，可以找出雷射二極體的射頻訊號輸入工作範圍為 -30 ~ +5 dBm 之間。

圖 9 為失真度量測結果，我們利用單一輸入載波量測輸入與輸出之關係，得到藍色曲線 (fundamental)，再利用兩個輸入載波觀察兩個載波之三階諧波失真的大小<sup>(19)</sup>，得到紅色曲線 (3<sup>rd</sup> order harmonics)，並由兩個延伸曲線之交點找到系統的輸入三階截取點 (third-order input intercept point, IIP3) 與輸出三階截取點 (third-order output intercept point, OIP3)，另外再由系統雜訊層 (noise floor) 與紅色曲線之交點找出系統的無雜散動態範圍 (spurious-free dynamic range, SFDR)。

### 3. RoF 鏈路預算

鏈路預算 (link budget) 是要決定在 RoF 系統中

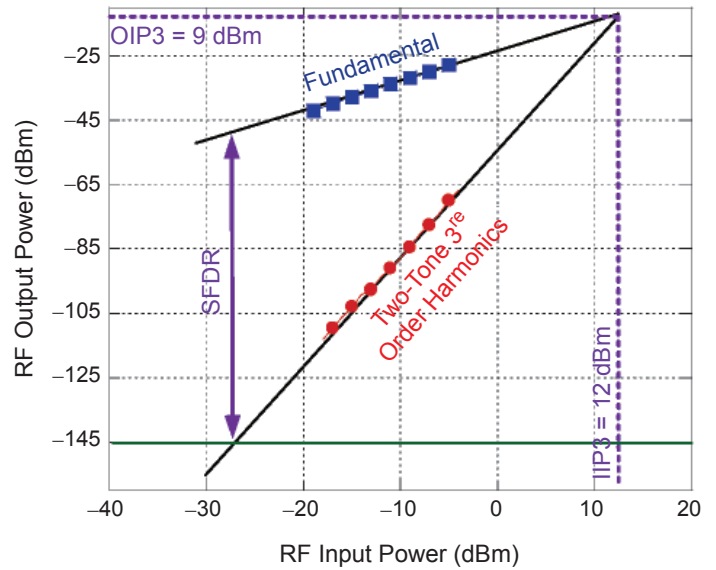


圖 9. 失真度量測結果。

上行與下行路徑中需加入多少功率 (電放大器)，以符合不同應用之需求。在本文中的實測範例中，將 RoF 應用於建築物內，所以預先設定 RoF 的天線輸出功率為 0 dBm，此功率大小已足夠涵蓋較小之室內範圍，依量測所得之結果，光電與電光轉換會有 21 dB 的損失，電循環器會有 1 dB 的損失。上行與下行鏈路預算結果如圖 10 所示，在下行中為了讓輸入功率與輸出功率相同且為 0 dBm，必須加入有 23 dB 增益的電放大器，來補償光電、電光轉換以及兩個電循環器所造成的功率損失。由於上行與下行鏈路預算必須相同，所以在上行路徑也必須加入一相同增益大小的電放大器，來補償系統損失。

### 4. RoF 模組製作

根據前述所要求的設計重點，包括選定雷射工作點、決定射頻輸入之工作範圍、鏈路預算以及所挑選之電功率放大器，分別完成電光轉換模組、光電轉換模組、放大器模組以及電源模組。

圖 11 中為我們所完成之 RoF 模組，其中 HEU 與 RAU 分別由電光轉換模組、光電轉換模組、電放大器、電循環器、天線以及電源供應模組所組成。

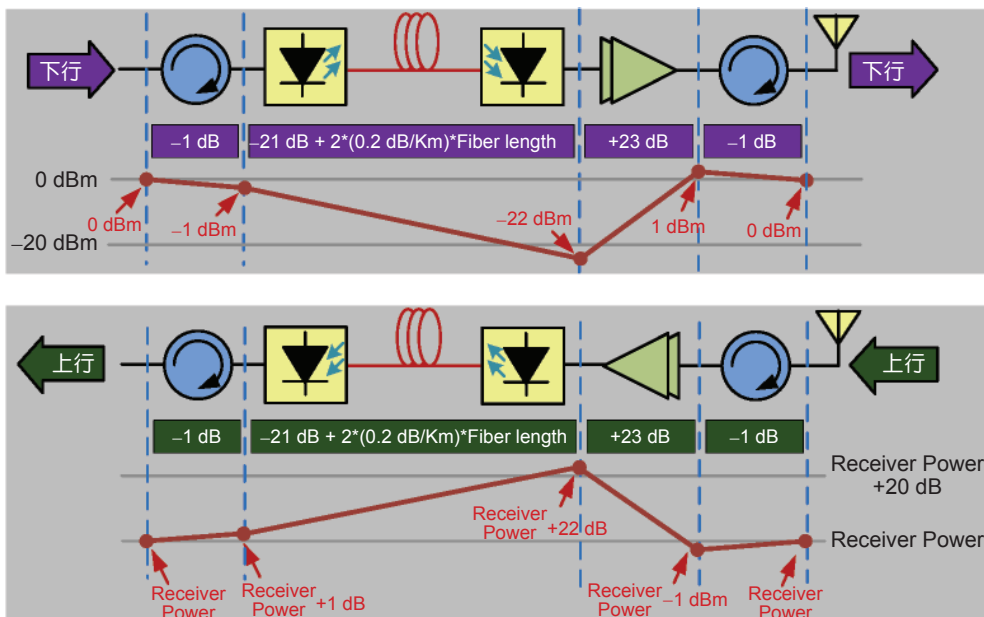


圖 10. RoF 模組上行與下行鏈路預算圖。

#### 四、室內 RoF 架設與場域量測

##### 1. 室內訊號品質量測

在本文中，利用台灣科技大學國際大樓頂樓所架設之 WiMAX 基地台來當作量測訊號源，如圖 12(a) 所示，台灣科技大學電資大樓 8 樓所架設之復訊器是為了當作 RoF 系統之訊號源用，基地台與復訊器之間距離約 200 公尺左右。在架設 RoF 系統前我們先依據基地台所提供之 WiMAX 訊號，量測在電資大樓 1 樓至 8 樓的 WiMAX 傳輸速率，其量測結果如圖 12(b) 所示<sup>(20)</sup>。在高樓層中 (4 樓-8 樓)，因為量測點距離基地台較近以及阻

擋較少，所以上行與下行傳輸速率都可以達到官方提供之滿載速率 (上行傳輸速率 2 Mbps、下行傳輸速率 4 Mbps)，但在較低樓層 (1 樓-3 樓)，由於阻擋之建築物較多，有許多地方傳輸品質不良甚至無法連上線，所以挑選電資大樓地下一樓，來當作 RoF 系統實測之場地，由於這一層樓完全無法接收到 WiMAX 訊號，可以直接比較出 RoF 模組安裝前後之差異。

##### 2. RoF 系統架設與量測

台科大校園內之 RoF 系統配置圖如圖 13 所示，其中包含電資大樓 8 樓之 WiMAX 復訊器以

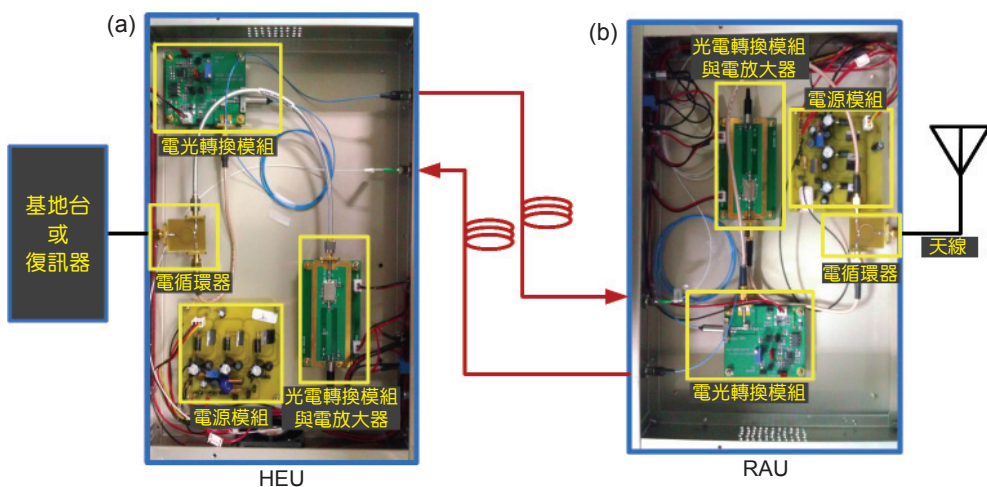


圖 11. RoF 模組包括 (a) HEU 模組與 (b) RAU 模組。

圖 12.  
 (a) 基地台與復訊器相對位置圖，(b) 室內 1 樓至 8 樓之傳輸速率量測結果。

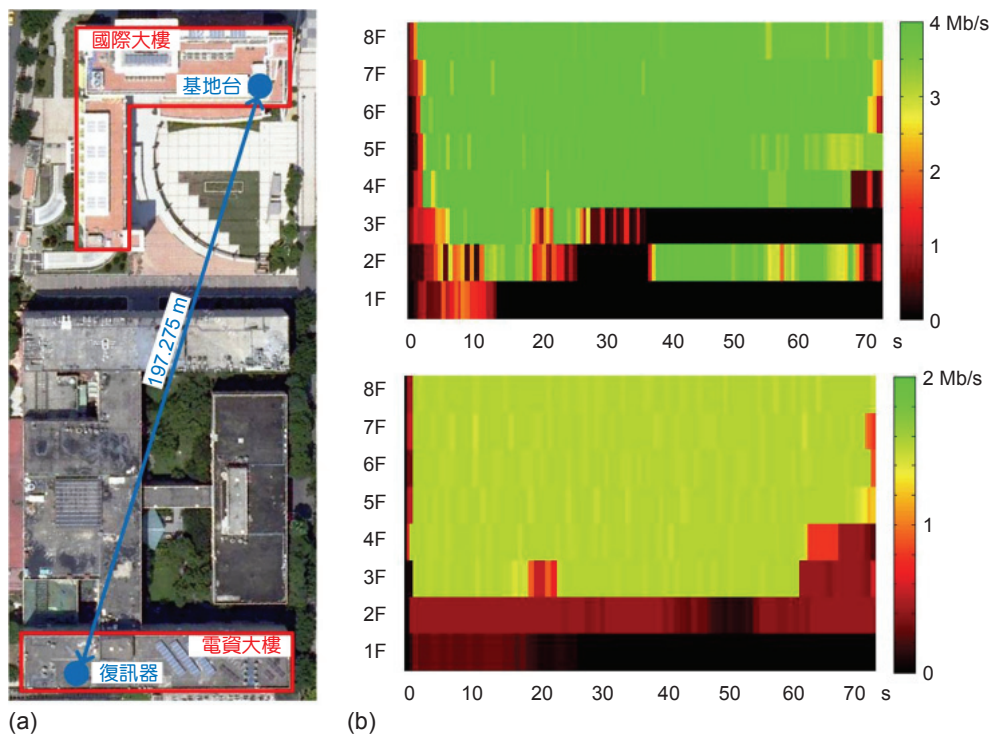
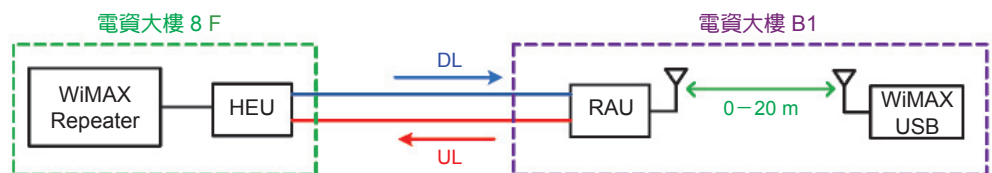


圖 13.  
 RoF 系統之配置圖。



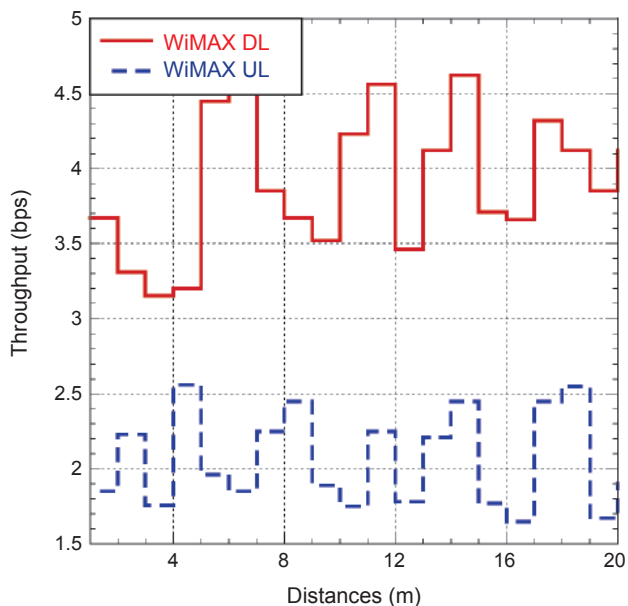


圖 14. 架設 RoF 系統後之 WiMAX 上下行速率量測結果。

及 HEU 模組，並透過上行與下行光纖連接至地下一樓之 RAU 模組，其量測結果如圖 14 所示。未架設 RoF 之前，電資大樓地下一樓均無法連線至 WiMAX 系統，當 RoF 架設完成後，地下一樓的傳輸速率均能達到上行 (UL) 平均 2 Mbps 以及下行 (DL) 平均 4 Mbps 的水準。

## 五、結論

本文介紹了 RoF 技術及其應用，包括系統設計時元件規格之挑選、靜態與動態特性分析、模組製作以及實際量測結果。提供設計 RoF 模組時，挑選雷射二極體以及檢光二極體的方式，藉由計算以及量測決定系統之動態範圍及失真度，依據不同應用，透過鏈結預算來決定系統所需外加之電放大器功率大小，並完成 E/O 轉換模組、O/E 轉換模組以及電源供應模組，分別組成 RoF 中的 HEU 與 RAU 模組。

透過台灣科技大學的 WiMAX 測試環境，量測出室內各樓層的訊號傳輸速率，找出合適之 RoF 架設及測試地點，並且量測 RoF 架設前後之差異，由完全無法連線到上行平均速率 2 Mbps 以及下行平均速率 4 Mbps 的水準。所以 RoF 很適合用

於現有的 WiMAX 及 3G 網路，來解決大樓內無線電波常受到阻隔的問題，用以改善室內的訊號品質以及提高訊號覆蓋率。

## 誌謝

感謝國科會 (NSC 101-2219-E-002-003) 對於此研究所提供的財務支援，感謝工研院在技術上的協助以及蔣政君、林庭瑋以及李哲先等人對於本研究計畫皆有重要的貢獻。

## 參考文獻

1. C. Lim, A. Nirmalathas, M. Bakaul, P. Gamage, K. L. Lee, Y. Yang, D. Novak, and R. Waterhouse, *J. Lightwave Technol.*, **28**, 390 (2010).
2. W. S. C. Chang, *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links*, Cambridge Univ. Press, 422 (2002).
3. D. Wake, D. Johansson and D. G. Moodie, *Electron. Lett.*, **33** (5), 404 (1997).
4. J. B. Song and A. H. M. Razibul Islam, *J. Lightwave Technol.*, **26** (5), (2008).
5. T. Koonen, A. Ng'oma, P. Smulders, H. V. D. Boom, I. T. Monroy, G.-D. Khoe, *Phot. network commun.*, **5**, 177 (2003).
6. M. Garcia Larrode, A. M. J. Koonen, J. J. Vegas Olmos, *Proc. of Int. Top. Meeting on Microwave Phot., Grenoble*, (2006).
7. Z.-Jia, J. Yu, G. Ellinas, G.-K. Chang, *OFC/NFOEC*, (2007).
8. Z.-Jia, J. Yu, A. Chowdhury, G. Ellinas, and G.-K. Chang, *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **19** (20), 1691 (2007).
9. Z. Jia, J. Yu, D. Qian, G. Ellinas, and G.-K. Chang, *OFC/NFOEC*, (2008).
10. W.-Y. Choi and J.-Y. Kim, *OFC/NFOEC*, (2007).
11. GANDALF, <http://www.ist-gandalph.org/>
12. H.-H. Lu, W.-I. Lin, Y.-W. Chuang, S.-J. Tzeng, and W.-J. Ho, *OFC/NFOEC*, (2007).
13. A. M. J. Koonen and A. Ngoma, *Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: System Technologies and Development Strategies*, New York: Wiley (2006).
14. G. Shen, R. S. Tucker, and C.-J. Chae, *IEEE Commun. Mag.*, pp. 44-50, (2007).
15. L. Guennec, Y. Pizzinat, A. M. Sylvain, *J. Lightwave Technol.*, **27**, 2649 (2009).
16. K. Chinen, *Opto-Electron. and Commun. Conf.*, 1-2 (2008).
17. J. E. Mitchell, *Electron. Lett.*, **40** (21), 1353 (2004).
18. IEEE Standard, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*, IEEE (2006).
19. C. Rauscher, *Fundamentals of Spectrum Analysis*, 6th ed. Rohde & Schwarz (2008).

20. 蔣政君, WiMAX 室內傳輸 RoF 系統之設計與實現, 國立台灣科技大學碩士論文 (2010).

---



莊明學先生為淡江大學電機博士，現任國立台灣科技大學電子系博士後研究員。

Ming-Hsueh Chuang received his Ph.D. in electrical from Tamkang University.

He is currently a postdoctoral research in the Department of Electronics Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.



李三良先生為美國加州大學聖塔芭芭拉分校博士，現任國立台灣科技大學副校長、研發長以及電子系教授。

San-Liang Lee received his Ph.D. degree in electrical and computer

engineering from the University of California, Santa Barbara (UCSB). He is currently a Vice President, Dean of Research and Development Office and professor of Department of Electronics Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.